

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE DE LOS TIPOS AUSTENÍTICO AISI 304 Y DÚPLEX AISI 2304

¹Medina, E.*; ¹Cobo, A.; ²Bastidas, D. M.

¹Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica, Universidad Politécnica de Madrid.
Avda. Juan de Herrera 7, 28040 Madrid. Grupo de investigación “Patología de estructuras, protecciones colectivas y medios auxiliares de edificación”.

²CENIM- Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, CSIC

Avda. Gregorio del Amo 8, 28040 Madrid.

*e-mail: eduardo.medina@upm.es

RESUMEN

La durabilidad de las estructuras de hormigón armado no es ilimitada, en especial en determinados ambientes. El ingreso de agentes agresivos en el hormigón, fundamentalmente dióxido de carbono e iones cloruro, rebasando el espesor del recubrimiento y alcanzando las armaduras, reducen el alto pH del hormigón hasta alcanzar un umbral crítico, por debajo del cual, el acero queda despasivado. Posteriormente, si existe el suficiente aporte de humedad y oxígeno, el acero se corroe, lo que supone drásticas reducciones de la vida útil de servicio de estas estructuras y su inevitable reparación.

La utilización de armaduras de acero inoxidable, a pesar de su alto coste inicial en comparación con el acero al carbono, es una alternativa que está recibiendo cada vez más consideración. Su resistencia a la corrosión en los ambientes más agresivos, incluso con ataque de cloruros, lo convierte en el material idóneo para prolongar de forma muy considerable la vida útil de la estructura.

En este trabajo se ha evaluado el comportamiento mecánico y estructural de dos aceros inoxidables, el más utilizado EN 1.4301 (AISI 304) de tipo austenítico para usos generales y el acero dúplex EN 1.4362 (AISI 2304), y se han comparado con el tradicional acero al carbono B500SD. El estudio se ha realizado a nivel de barra, determinando las propiedades mecánicas y de ductilidad de los tres aceros, y a nivel de sección, evaluando su comportamiento a flexión con diferentes cuantías de armado de los tres aceros a partir de los diagramas momento-curvatura.

El resultado del estudio demuestra que los aceros inoxidables presentan diferente comportamiento que el acero al carbono, lo que se debe tener en cuenta en el análisis elástico y plástico a nivel de sección y estructural.

1.- Introducción

La durabilidad de las estructuras de hormigón se ve comprometida por el ingreso de agentes agresivos, fundamentalmente dióxido de carbono e iones cloruros, que rebasan el recubrimiento de hormigón a través de sus poros, reducen su pH en grandes áreas o localmente, y despasivan el acero.

El espesor del recubrimiento y su permeabilidad son los dos factores que controlan su eficacia como barrera física que protege las armaduras.

El dióxido de carbono de la atmósfera reduce el pH del hormigón de forma global en toda el área expuesta, atravesando progresivamente el recubrimiento de hormigón hasta alcanzar las armaduras. Los iones cloruros, presentes en atmósferas salinas, reducen el pH de forma local.

Cuando el pH del hormigón (inicialmente altamente alcalino, de valor 12.5 a 13) es inferior a 9.5 [1] las armaduras quedan despasivadas, es decir, expuestas a una

posible corrosión que sólo se producirá si se dispone de oxígeno y humedad simultáneamente. La carbonatación provocará una corrosión generalizada de las armaduras en la zona afectada, mientras que los cloruros, al romper la película pasiva sólo en pequeñas áreas, producen corrosión por picaduras.

Los productos de la corrosión, con sólo una penetración en el acero $\leq 100 \mu\text{m}$, se expanden y superan la resistencia a tracción del hormigón, fisurándolo [2].

Una vez iniciada la corrosión, el pH en la interfase acero-productos de la corrosión es ácido, aún en el seno de un medio muy alcalino como el hormigón, por lo que no son necesarios los cloruros para mantener la corrosión [3].

El ataque de los cloruros es un problema muy difícil de evitar. La instrucción EHE-08 limita el contenido total de cloruros al 0.4% en peso del cemento [4]. Métodos como la realcalinización electroquímica, si bien son capaces de eliminar las causas de la corrosión, no son suficientes para detener el proceso de corrosión si las armaduras ya se encuentran en estado activo, por lo que se deben utilizar como métodos preventivos no como métodos de rehabilitación [5]. Algunos estudios se inclinan por la adición de productos al cemento o al hormigón para proteger las armaduras [6].

La característica que singulariza el corrugado de acero inoxidable frente al de acero al carbono es su excelente resistencia a la corrosión por cloruros. Los aceros inoxidables austeníticos y dúplex son los tipos recomendados para su utilización en el hormigón, debido a su alta resistencia a la corrosión.

El acero inoxidable austenítico es el más utilizado y es conocida su resistencia a la corrosión en hormigones con gran contenido de cloruros. Su tolerancia a los cloruros es de 5 a 10 veces superior a la del acero al carbono [7]. El acero inoxidable dúplex es más económico que el austenítico, por su menor contenido de níquel, y sin embargo, presenta una mayor resistencia a la corrosión por picaduras de cloruros [8]. En todos los casos, los aceros inoxidables permiten relajar unas medidas de durabilidad del hormigón pensadas, en su origen, para proteger el acero al carbono [9-10].

Además, diferentes estudios demuestran que el uso de barras de acero inoxidable y acero al carbono en la armadura de una misma estructura de hormigón no aumenta el riesgo de corrosión de dicha armadura en comparación con una armadura únicamente de acero al carbono, incluso cuando dichas barras están en contacto (eléctrico) directo [11-12].

Por lo tanto, la utilización de armaduras de acero inoxidable, del tipo austenítico o dúplex, en la estructura completa, o sólo en algunos de sus elementos que vayan a estar expuestos a ambientes agresivos, especialmente con presencia de iones cloruros, mejora notablemente la durabilidad de la estructura, por lo que es una alternativa que está recibiendo cada vez más consideración, a pesar de su alto coste inicial en comparación con el acero al carbono.

Sin embargo, la utilización de armaduras de acero inoxidable es escasa y no se tiene conocimiento con detalle de su comportamiento mecánico y estructural, como sí se tiene del acero al carbono.

2.- Experimental

Para evaluar el comportamiento mecánico y estructural de los aceros inoxidables corrugados, se han comparado dos tipos, el austenítico AISI 304 (EN 1.4301) y el dúplex AISI 2304 (EN 1.4362) (ver composición en la Tabla 1), con el acero al carbono B500SD utilizado en la actualidad en la mayoría de las estructuras de hormigón.

El trabajo se ha realizado a dos niveles: de barra y de sección. A nivel de barra, el estudio se ha desarrollado experimentalmente, ensayando a tracción barras corruga-

das de diferentes diámetros de acuerdo a las normas UNE-EN 10002-1 y UNE-EN ISO 15630-1 [13-14], con una máquina universal de ensayos Ibertest, modelo MIB 60/AM, y analíticamente, estudiando los parámetros de ductilidad de cada uno de los aceros ensayados. A nivel de sección, el estudio se ha realizado analíticamente, elaborando los diagramas momento-curvatura de dos secciones tipo de viga de hormigón, una plana y otra de canto, armadas ambas con diferentes supuestos de cuantía de acero inoxidable y acero al carbono, y comparando los resultados entre sí.

Aero	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N	Mo
AISI 304	0.07	0.75	2.00	0.075	0.015	18.50	9.00	-	-	-
AISI 2304	0.03	1.00	2.00	0.035	0.010	23.00	3.50	0.20	0.10	0.20
B500SD	0.45	0.22	0.72	<0.01	0.022	0.13	0.13	0.18	-	-

Tabla 1. Composición química [%] de los aceros ensayados.

Para los ensayos a tracción se eligieron los diámetros nominales de 8, 16 y 20 mm. Las barras corrugadas del diámetro 8 mm, de los tres aceros, se han fabricado mediante laminado en frío, mientras que las de los diámetros 16 y 20 mm han sido elaboradas mediante laminado en caliente. De cada diámetro se han ensayado dos probetas, denominadas A y B.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de tracción, se han calculado los parámetros de ductilidad de los tres aceros, de acuerdo a los siguientes criterios:

- a.- El establecido en diferentes normativas europeas, concretamente la instrucción EHE-08, el Código Modelo 90, los Eurocódigos 2 y 8 [4, 15-17], mediante los dos parámetros siguientes:
 - Relación entre la carga de rotura y el límite elástico f_s/f_y o ratio de endurecimiento a tracción.
 - Deformación para la carga máxima $\varepsilon_{m\acute{a}x}$.
- b.- El concepto de acero equivalente según el parámetro p de Cosenza (ec. 1 y 2), el área A_{nom} definido por Creazza (ec. 3) y el índice de tenacidad I_d de Ortega (ec 4) [18-20].

$$p = \varepsilon_{m\acute{a}x}^{0,73} \cdot \left(\frac{f_s}{f_y} - 1 \right)^{0,92} \cong \varepsilon_{m\acute{a}x}^{0,75} \cdot \left(\frac{f_s}{f_y} - 1 \right)^{0,9} \quad (1)$$

$$p = \left(\frac{f_s}{f_y} - 1 \right)^{0,9} \cdot [(\varepsilon_{m\acute{a}x} - \varepsilon_{sh}) + 4 \cdot (\varepsilon_{sh} - \varepsilon_y)]^{0,75} \cong \left(\frac{f_s}{f_y} - 1 \right)^{0,9} \cdot (\varepsilon_{m\acute{a}x} + 3 \cdot \varepsilon_{sh})^{0,75} \quad (2)$$

$$A_{nom} = \frac{2}{3} (\varepsilon_{m\acute{a}x} - \varepsilon_y) (f_s - f_y) \quad (3)$$

$$I_d = \left(1 + \frac{f_s}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{m\acute{a}x}}{\varepsilon_y} - 1 \right) \quad (4)$$

Donde ε_{sh} es la deformación unitaria al final del escalón de cedencia y ε_y la deformación en el límite elástico.

c.- La propuesta del CEB (Comité Euro-International du Béton) de la nueva clasificación de ductilidad del acero, que para el de alta ductilidad o Clase S establece los siguientes límites [21]:

$$(f_t / f_y - 1)_k \geq 0.13 \quad y \quad \epsilon_u \geq 9\% \quad (5)$$

$$(f_t / f_y - 1)_k \geq 0.15 \quad y \quad \epsilon_u \geq 6\% \quad (6)$$

$$(f_t / f_y - 1)_k \geq 0.17 \quad y \quad \epsilon_u \geq 5\% \quad (7)$$

En la Tabla 2 se recogen las características mínimas de ductilidad para los aceros de ductilidad alta, según las normativas europeas mencionadas y la propuesta que realiza el CEB, y los cálculos correspondientes de los parámetros de ductilidad según el concepto de acero equivalente de los tres autores citados.

Norma	Tipo de acero	f_s/f_y	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ %	ρ	A_{nom} N/mm ² (a)	Id (a)
EHE 08	SD	1.20 – 1.35	7.5	1.06 – 1.76	362.50	63.8 – 68.15
CM 90	S	1.15	6.0	0.70	287.50	49.45
EC 2	H	1.08	5.0	0.34	237.50	39.52
EC 8 (b)	DCH	1.20 – 1.35	9.0	1.22 – 2.02	437.50	77.0 – 82.25
Propuesta CEB	S	1.13	9.0	0.83	437.50	74.55
		1.15	6	0.70	287.50	49.45
		1.17	5	0.68	237.50	41.23

(a) Parámetros calculados para aceros con los siguientes valores mínimos:

$$\epsilon_y = f_y/E = 500/200000 = 0.25 \%, \quad f_s - f_y = 575 - 500 = 75 \text{ N/mm}^2.$$

(b) Aplicable a estructuras sismorresistentes.

Tabla 2. Características mínimas de ductilidad.

Vigas planas 50 x 30 cm				Vigas de canto 30 x 50 cm			
Nº	Armadura	Cuantía ‰	Observación	Nº	Armadura	Cuantía ‰	Observación
P1	4 Ø12	3.02	Cuantía mínima	C1	4 Ø12	3.02	Cuantía mínima
P2	3 Ø16	4.02		C2	2 Ø16 y 1 Ø12	3.43	
P3	5 Ø16	6.70		C3	4 Ø16	5.36	
P4	6 Ø16	8.04		C4	6 Ø16	8.04	
P5	7 Ø16	9.38		C5	6 Ø20	12.57	
P6	5 Ø20	10.47		C6	8 Ø20	16.76	
P7	6 Ø20	12.57					
P8	8 Ø20	16.76					

Tabla 3. Vigas consideradas en el estudio de los diagramas momento-curvatura.

Respecto al estudio a nivel de sección, se han elaborado, por iteración, los diagramas momento-curvatura de dos secciones de vigas tipo, una viga plana de 50x30 cm y otra de canto de 30x50 cm, ambas armadas con diferentes cuantías de armadura (Tabla 3), y para cada uno de los aceros considerados, al carbono e inoxidable.

A partir de los diagramas momento-curvatura obtenidos, se han comparado los valores de ductilidad de las secciones, definida como el cociente entre la curvatura última y la curvatura elástica de la sección.

3.- Resultados y discusión

3.1.- Ensayos a tracción de las armaduras

Los resultados de los ensayos de tracción de cada una de las probetas de las barras corrugadas, de los tres aceros, se recogen en la Tabla 4.

Acero	Ø mm	Probeta	f_s N/mm ²	f_y N/mm ²	E N/mm ²	ϵ_y %	$\epsilon_{máx}$ %
B-500-SD	8	A	878	679	221202	0.59	8.13
		B	872	689	211433	0.61	8.61
	16	A	735	598	212536	0.30	13.76
		B	736	607	200866	0.32	12.87
	20	A	667	552	202407	0.29	11.34
		B	675	560	208821	0.29	12.34
AISI 304	8	A	1059	1032	130406	1.19	5.82
		B	1062	1023	159508	1.00	5.82
	16	A	732	530	177625	0.53	19.12
		B	754	567	170432	0.57	18.24
	20	A	738	539	186256	0.52	30.87
		B	719	476	171750	0.51	29.36
AISI 2304	8	A	1066	1000	193578	0.83	6.78
		B	1066	1006	184166	0.87	7.26
	16	A	726	543	175453	0.54	21.79
		B	697	515	181883	0.51	27.13
	20	A	746	608	185543	0.57	28.37
		B	748	610	182733	0.56	22.87

Tabla 4. Resultados de los ensayos de tracción de las barras corrugadas.

A la vista de los resultados se desprende que la resistencia en el límite elástico f_y sólo presenta diferencias con motivo del proceso de fabricación de las barras, laminadas en caliente o en frío, y no por el tipo de acero con el que están elaboradas. Las barras laminadas en caliente de los tres aceros toman valores de resistencia en el límite elástico entre 476 y 610 N/mm², por lo que a efectos de cálculo estructural, el valor característico de 500 N/mm² parece también el adecuado para los aceros inoxidables. Respecto a las barras laminadas en frío, que son todas las de diámetro Ø8 mm, toman valores un 50% más altos las de acero inoxidable que las de acero al carbono.

Con los valores de resistencia máxima f_s ocurre algo semejante. Las diferencias las encontramos entre barras laminadas en caliente o en frío, y no por el tipo de acero.

En cambio, respecto al módulo de elasticidad E, se encuentran diferencias notables entre el acero al carbono y los inoxidables, como podemos ver en la gráfica de la figura 1, y sin embargo, son despreciables por los diámetros de las barras o su

proceso de fabricación. Sólo las barras laminadas en frío de acero inoxidable AISI 304 tienen valores claramente inferiores a sus homólogas laminadas en caliente.

Según el gráfico, se desprende que el valor del módulo de elasticidad que se debe establecer para las armaduras de acero inoxidable es inferior a los 200000 N/mm² que la instrucción EHE-08 fija para los aceros al carbono. Para este trabajo, y a la vista de los resultados de los ensayos, se ha tomado como valor garantizado para el módulo de elasticidad longitudinal de las armaduras inoxidables 170000 N/mm². En algunos trabajos podemos encontrar resultados similares [22-23] incluso en el caso de perfiles de acero austenítico laminados en frío [24]

En la figura 2 se representa el diagrama tensión-deformación adoptado en los cálculos de los diagramas momento-curvatura para las armaduras de acero inoxidable. Cuando el acero inoxidable alcanza su límite elástico de cálculo:

$$f_{yd} = 500 \text{ N/mm}^2 / 1.15 = 434.78 \text{ N/mm}^2$$

su deformación toma el valor:

$$\epsilon_{yd} = f_{yd} / E_s = 434.78 / 170000 = 0.00256 = 2.56 \text{ ‰}.$$

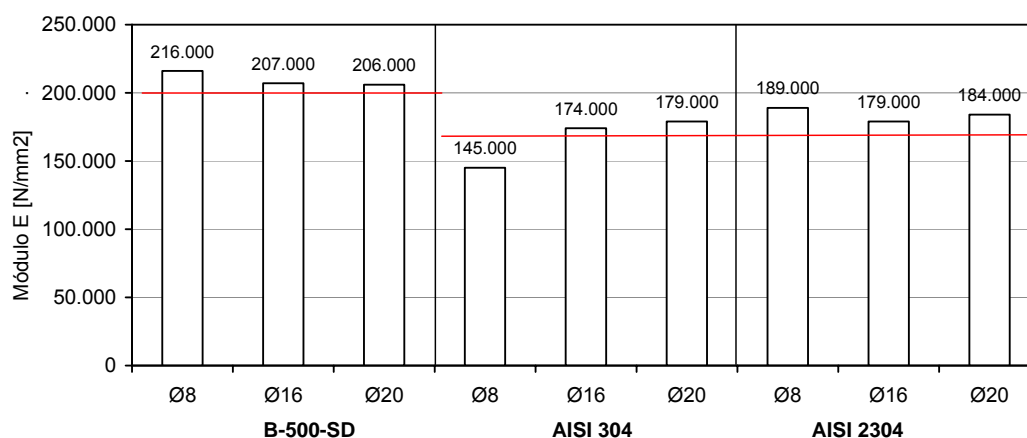


Fig. 1 Comparativa de los valores medios del módulo de elasticidad E.

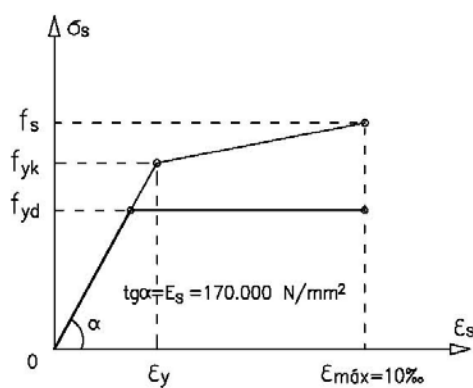


Fig. 2 Diagrama tensión-deformación adoptado para los aceros inoxidables.

3.2.- Parámetros de ductilidad de las armaduras

A partir de los resultados de los ensayos de tracción, se han calculado los parámetros de ductilidad de cada probeta de acuerdo a la normativa europea y al concepto de acero equivalente, que se resumen en la Tabla 5.

Si comparamos los resultados obtenidos en términos de f_s/f_y , y los valores de las deformaciones máximas $\epsilon_{máx}$ alcanzada por las barras, se puede comprobar que hay diferencias notables entre los tipos de acero y entre los sistemas de fabricación.

En el caso de las barras corrugadas laminadas en caliente, todos los aceros cumplen con los requisitos mínimos de ductilidad que establecen las normativas consideradas (Tabla 2) pero, mientras que las barras de acero al carbono se quedan muy cerca de dichos límites mínimos, las barras de acero inoxidable los superan muy por encima, especialmente las deformaciones máximas, que llegan a duplicar a las del acero B500SD para algunos diámetros.

Acero	Ø mm	Probeta	fs/fy	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ %	p	A_{nom} N/mm ²	Id	ϵ_{sh} % (*)
B-500-SD	8	A	1.29	8.13	1.60	1037	54.88	-
		B	1.27	8.61	1.52	1008	53.95	-
	16	A	1.23	13.76	2.32	1228	100.05	1.41
		B	1.21	12.87	2.16	1089	86.07	1.60
	20	A	1.21	11.34	1.90	845	83.66	1.40
		B	1.21	12.34	1.80	923	93.00	0.78
AISI 304	8	A	1.03	5.82	0.14	89	11.39	-
		B	1.04	5.82	0.20	134	14.96	-
	16	A	1.38	19.12	3.86	2543	139.36	-
		B	1.33	18.24	3.23	2217	115.43	-
	20	A	1.37	30.87	5.35	4059	232.94	-
		B	1.51	29.36	6.87	4697	243.17	-
AISI 2304	8	A	1.07	6.78	0.36	275	23.22	-
		B	1.06	7.26	0.35	265	23.36	-
	16	A	1.34	21.79	3.79	2618	150.16	-
		B	1.35	27.13	4.65	3249	206.82	-
	20	A	1.23	28.37	3.23	2572	176.91	-
		B	1.23	22.87	2.74	2066	139.40	-

(*) ϵ_{sh} es la deformación porcentual al final del escalón de cedencia, determinada en el ensayo de tracción de la barra conformada en caliente. Su valor es necesario para calcular el parámetro p de Cosenza.

Tabla 5. Parámetros de ductilidad de cada probeta ensayada.

En cambio, en el caso de las barras deformadas en frío, es decir, las armaduras de diámetro Ø8, vemos que, mientras las armaduras de acero B500SD cumplen con todos los requisitos de ductilidad, las armaduras de acero inoxidable no lo consiguen. Sólo se acercan a los límites del Eurocódigo 2, que son los menos exigentes.

En el caso del Eurocódigo 8, más restrictivo por estar referido al cálculo de estructuras frente a sismo, que marca una deformación máxima del 9% como mínimo, los incumplimientos son generalizados para las armaduras laminadas en frío de los tres aceros, especialmente de los inoxidables.

En cuanto a los criterios de ductilidad según el concepto de acero equivalente, los aceros inoxidables consiguen un índice muy superior al del acero al carbono y al que se obtendría como valor mínimo según los criterios estrictos de la normativa considerada en el estudio, a excepción nuevamente de las barras de diámetro Ø8, laminadas en frío, que alcanzan altas resistencias pero muy escasas deformaciones en resistencia máxima.

En el caso concreto del diámetro Ø20 del acero AISI 304, el valor medio del parámetro p obtenido es de 6.11, lo que supone tener una capacidad de rotación $6.11/1.85 = 3.3$ veces superior a la barra similar de acero al carbono. En cambio, las barras de acero AISI 304 laminadas en frío tienen un parámetro p medio de 0.17 frente a 0.56 de sus homólogas de acero al carbono, es decir, proporcionan una capacidad de rotación 3.3 veces inferior.

Si analizamos la clasificación de ductilidad según la propuesta que realizó el CEB, basándose en la formulación de Cosenza, los resultados se recogen en la figura 3. La línea quebrada gruesa establece el límite mínimo de valores para los aceros de alta ductilidad tipo “S” (según las ec. 5-7). Las dos armaduras que quedan fuera de la línea quebrada se corresponden a los diámetros laminados en frío.

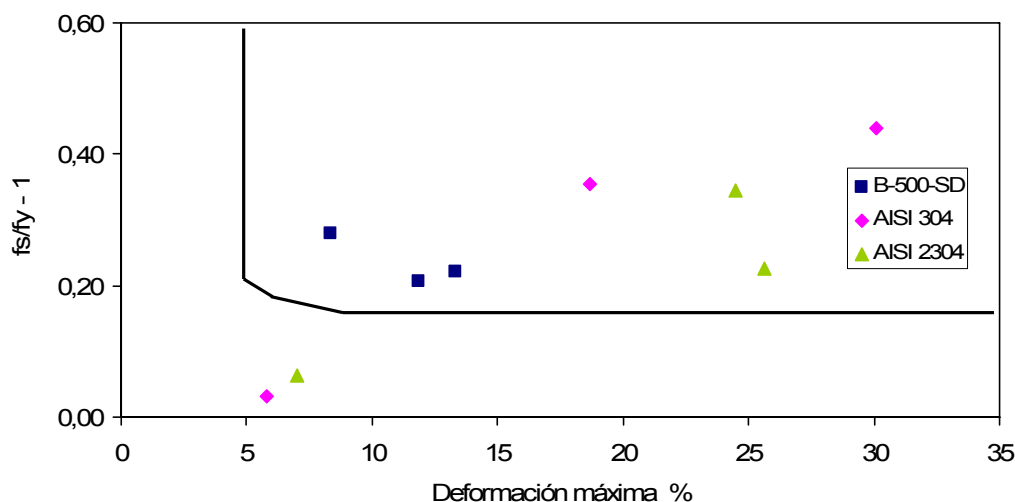


Fig. 3 Clasificación de ductilidad del acero tipo S propuesta por el CEB, y su comparación con los tres aceros ensayados.

De nuevo, se confirma que las armaduras de acero al carbono superan correctamente los límites mínimos de ductilidad, que las armaduras laminadas en caliente de acero inoxidable superan dichos límites con mucha mayor holgura, y que las armaduras laminadas en frío de acero inoxidable se quedan fuera de los requisitos de ductilidad para los aceros de “ductilidad alta”.

Por lo tanto, sea cual sea el criterio elegido de evaluación de la ductilidad de las barras corrugadas, se deduce claramente que mientras que las de acero inoxidable laminadas en caliente superan muy ampliamente a las armaduras de acero al carbono, las barras laminadas en frío de acero inoxidable no superan los límites mínimos exigidos, lo que las hace no aptas para armar elementos estructurales que requieran un mínimo de capacidad de rotación.

3.3.- Cálculos a nivel de sección

A partir de los diagramas momento-curvatura calculados de las secciones de viga consideradas (fig. 4 y 5), en la Tabla 6 se recogen los resultados de la curvatura elástica, curvatura última y de ductilidad de cada una de las secciones para el caso de su armado con acero al carbono B500SD, y en la Tabla 7 se recogen los valores correspondientes a las vigas armadas con acero inoxidable, considerando en los cálculos que estos aceros tienen un módulo de elasticidad longitudinal de 170000 N/mm^2 , valor real obtenido en los ensayos.

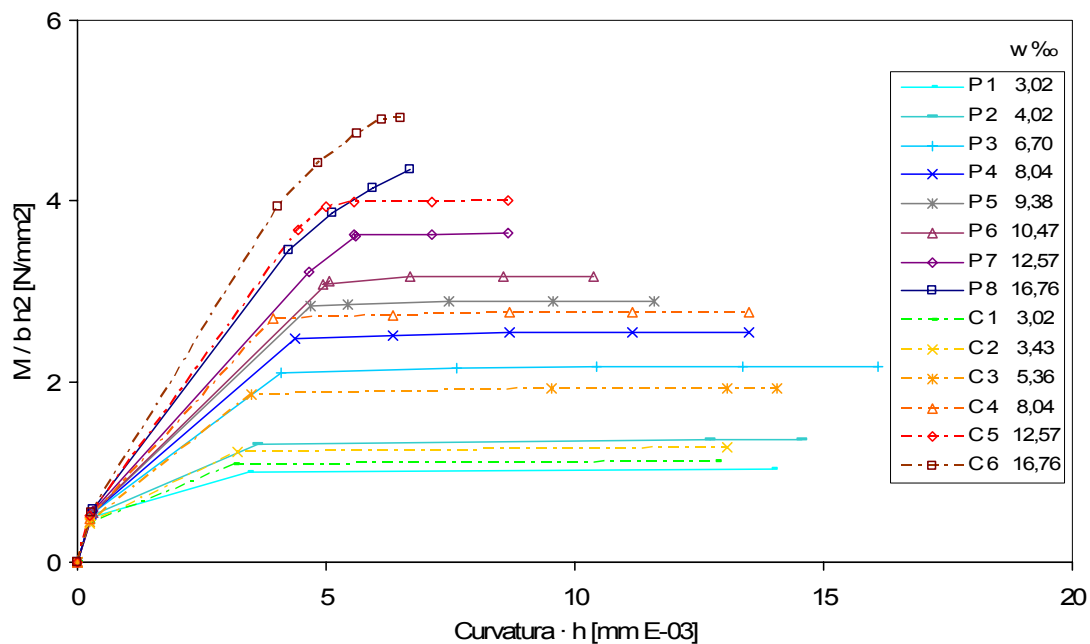


Fig. 4. Diagramas momento-curvatura relativo de las vigas, planas y de canto, armadas con diferentes cuantías w [‰] de acero al carbono B500SD.

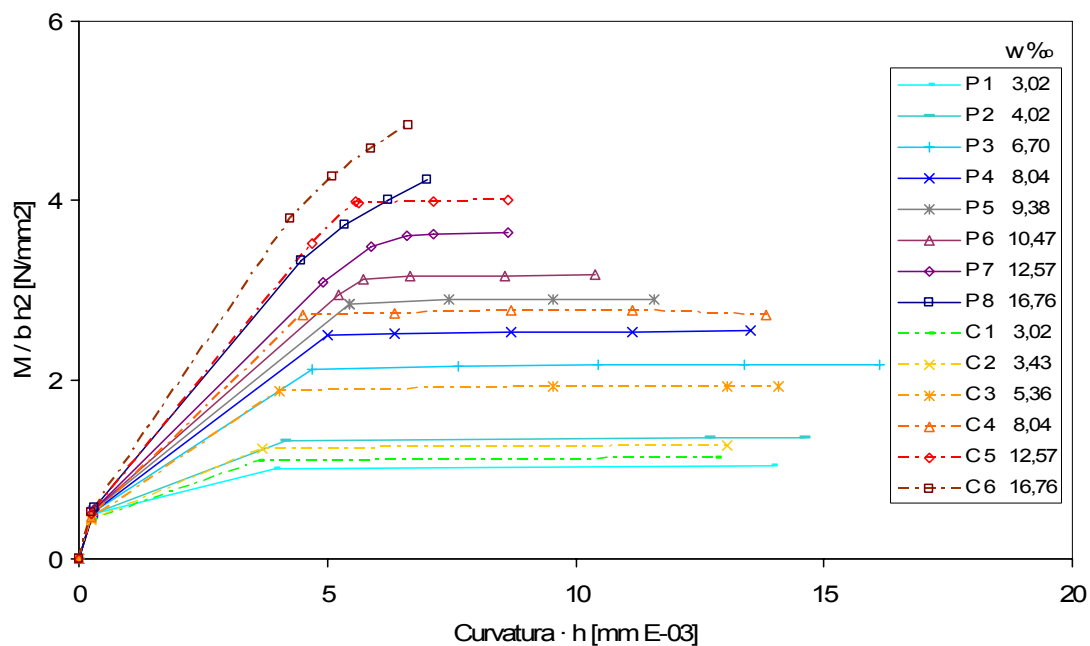


Fig. 5 Diagramas momento-curvatura relativo de las vigas, planas y de canto, armadas con diferentes cuantías w [‰] de acero inoxidable.

Si comparamos los valores de ductilidad de sección, se puede constatar que son casi siempre superiores en las secciones armadas con acero al carbono que en las armadas con acero inoxidable, con incrementos de 0.01 a 0.62 puntos, es decir, hasta un 25 % de mejora (en el caso de la viga P-4, armada con 6 Ø16).

Esa superior ductilidad de sección con las armaduras de acero al carbono es consecuencia de la mayor curvatura elástica que proporciona a la sección el acero inoxidable, debido a su menor módulo de elasticidad (170000 N/mm^2), y de mantener iguales en ambos aceros los valores de las curvaturas últimas, por estar limitadas a la deformación máxima del acero del 10‰ según normativa.

Viga	Armado B500SD	Curvatura elástica φ_e $\text{mm}^{-1} 10^{-6}$	Curvatura última φ_u $\text{mm}^{-1} 10^{-6}$	Ductilidad de la sección $D_s = \varphi_u / \varphi_e$
Plana 50x30 cm	P1: 4 Ø12	11.45	46.57	4.07
	P2: 3 Ø16	12.05	48.53	4.03
	P3: 5 Ø16	13.64	53.69	3.94
	P4: 6 Ø16	14.53	45.04	3.10
	P5: 7 Ø16	15.63	38.61	2.47
	P6: 5 Ø20	16.89	34.59	2.05
	P7: 6 Ø20	18.70	28.83	1.54
	P8: 8 Ø20	14.18 (*)	22.33	1.58
De canto 30x50 cm	C1: 4 Ø12	6.30	25.69	4.08
	C2: 1 Ø12 y 2 Ø16	6.43	26.11	4.06
	C3: 4 Ø16	7.01	28.15	4.02
	C4: 6 Ø16	7.86	27.03	3.44
	C5: 6 Ø20	10.02	17.30	1.73
	C6: 8 Ø20	12.23	12.97	1.06

(*) En este caso, el acero no alcanza su límite de fluencia. Esta curvatura se refiere a cuando el hormigón alcanza una deformación máxima del 2‰.

Tabla 6. Curvaturas y ductilidad de las secciones de viga armadas con acero B500SD.

Viga	Armado acero inoxidable	Curvatura elástica φ_e $\text{mm}^{-1} 10^{-6}$	Curvatura última φ_u $\text{mm}^{-1} 10^{-6}$	Ductilidad de la sección $D_s = \varphi_u / \varphi_e$
Plana 50x30 cm	P1: 4 Ø12	13.13	46.57	3.55
	P2: 3 Ø16	13.87	48.69	3.51
	P3: 5 Ø16	15.64	53.69	3.43
	P4: 6 Ø16	16.69	45.04	2.70
	P5: 7 Ø16	18.16	38.61	2.48
	P6: 5 Ø20	19.10	34.59	1.81
	P7: 6 Ø20	21.10	28.83	1.31
	P8: 8 Ø20	14.92 (*)	23.37	1.57
De canto 30x50 cm	C1: 4 Ø12	7.28	25.69	3.53
	C2: 1 Ø12 y 2 Ø16	7.42	26.11	3.52
	C3: 4 Ø16	8.06	28.15	3.50
	C4: 6 Ø16	9.02	27.66	3.07
	C5: 6 Ø20	11.29	17.30	1.53
	C6: 8 Ø20	8.50 (*)	13.29	1.56

(*) En este caso, el acero no alcanza su límite de fluencia. Esta curvatura se refiere a cuando el hormigón alcanza una deformación máxima del 2‰.

Tabla 7. Curvaturas y ductilidad de las secciones de viga armadas con acero inoxidable.

Esto lo podemos apreciar mejor en los dos gráficos de las fig. 6 y 7, donde se comprueba que la curvatura última de las secciones es la misma para los dos aceros y, en cambio, la curvatura elástica es casi siempre superior en el caso de los aceros inoxidables.

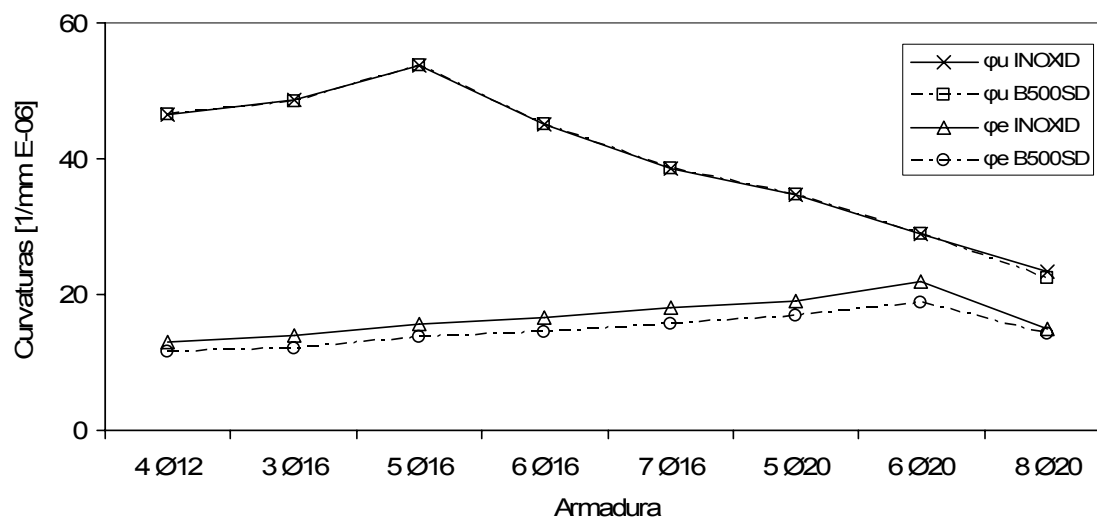


Fig. 6 Comparativa de las curvaturas elásticas y últimas de la sección de viga plana, armadas con diferentes cuantías de acero al carbono e inoxidable.

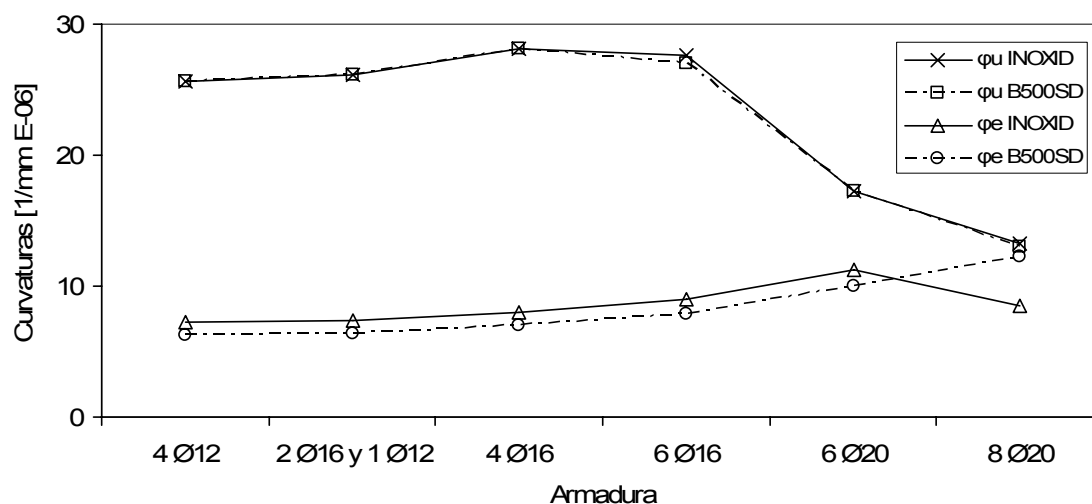


Fig. 7 Comparativa de las curvaturas elásticas y últimas de la sección de viga de canto, armadas con diferentes cuantías de acero al carbono e inoxidable.

Es decir, que un material más dúctil como es el acero inoxidable en comparación con el acero al carbono, proporciona secciones menos dúctiles.

El comportamiento de una armadura más allá de su deformación del 10‰ no es significativo desde el punto de vista del cálculo estructural. Lo importante en el hormigón armado es utilizar aceros con el mayor valor posible de módulo de elasticidad, lo que dará menores curvaturas elásticas, y por lo tanto, el cociente entre la curvatura última y la curvatura elástica, es decir, la ductilidad de la sección, será mayor.

La superior ductilidad del acero inoxidable respecto al acero al carbono se manifiesta para unas deformaciones que quedan fuera del cálculo estructural convencional, es decir, que no se puede aprovechar para aspectos tales como la redistribución de momentos, pero que tiene una ventaja importante en el caso de colapso de la estructura, para la que la distancia temporal que hay entre la aparición de fisuras alertantes para el usuario y la rotura final es fundamental. En este caso, no se puede hacer la comparación entre secciones teniendo en cuenta la curvatura última limitando al 10‰ la deformación máxima de las armaduras traccionadas, sino que se

debería establecer una “curvatura última de rotura” de la sección con una deformación máxima del acero mayor, que seguramente destacaría las excelentes cualidades de ductilidad de las armaduras de acero inoxidable.

4.- Conclusiones

Las armaduras de acero inoxidable laminadas en caliente, ensayadas en este trabajo, tienen una resistencia en el límite elástico y una resistencia máxima o de rotura similares a las armaduras de acero B500SD, sin diferencias apreciables entre los diámetros de barra de 16 y 20 mm. Sin embargo, alcanzan valores de deformación máxima que llegan a duplicar los valores de las armaduras de acero al carbono.

Las armaduras ensayadas de acero inoxidable laminadas en frío, presentan valores de resistencia en el límite elástico hasta un 50% superior a los valores de las armaduras equivalentes de acero al carbono. Sin embargo, la resistencia máxima es sólo un 20% superior en los aceros inoxidables que en el acero al carbono. Por otra parte, si bien las armaduras de acero inoxidable se alargan hasta valores muy altos en el ensayo de tracción antes de romperse, la deformación máxima alcanzada, entendida como la correspondiente a la carga unitaria de rotura, es inferior a la obtenida por las barras de acero al carbono. La diferencia entre la deformación máxima y la deformación en el límite elástico es del 7.8% en las armaduras de acero al carbono y de sólo del 5.2% en las de acero inoxidable.

La diferencia más importante encontrada entre las armaduras de acero inoxidable y las de acero al carbono es el valor del módulo de elasticidad E . En base a los resultados de los ensayos, se ha estimado que el valor medio garantizado del módulo de elasticidad para las armaduras de acero inoxidable es de 170000 N/mm^2 .

La ductilidad de las armaduras de acero inoxidable laminadas en caliente es superior a las armaduras de acero al carbono de calidad B500SD (el acero más dúctil empleado en España en la actualidad) cualquiera que sea el criterio elegido para evaluarla. Esa mayor ductilidad se debe principalmente a la muy alta deformación máxima alcanzada por las barras inoxidables, más que al cociente entre la carga unitaria de rotura y el límite elástico. Mientras que este cociente es sólo un 10% superior en las armaduras inoxidables que en las armaduras de acero al carbono, la deformación máxima es un 100% mayor.

En cambio, la ductilidad de las armaduras de acero inoxidable laminadas en frío no cumplen con los mínimos establecidos por las diferentes normativas para los aceros al carbono de ductilidad alta. El valor medio del cociente entre la carga unitaria de rotura y el límite elástico obtenido en los ensayos para esas barras es de 1.05, lo que supone igualar el límite mínimo que nuestra instrucción EHE-08 determina para los aceros B400S y B500S. Y el valor medio del alargamiento total bajo carga máxima alcanzado por las barras inoxidables es del 6.4%, lo que impide suministrar en rollo estas barras según la instrucción (que exige un mínimo del 7.5%). Por lo tanto, las armaduras inoxidables laminadas en frío ensayadas no deben utilizarse como armadura resistente en elementos estructurales que requieran una mínima capacidad de giro, es decir, de ductilidad.

El inferior valor de módulo de elasticidad del acero inoxidable, proporciona una mayor curvatura elástica a las secciones de hormigón armado para un mismo momento flector aplicado, en comparación con el acero al carbono. Y como la tensión en el límite elástico es la misma para ambos aceros, y la instrucción limita al 10‰ la deformación máxima del acero, resulta que la curvatura última de la sección es la misma tanto si se arma con acero al carbono como con acero inoxidable. Por tanto, la ductilidad de la sección resulta inferior para las secciones armadas con

acero inoxidable que para las armadas con acero al carbono. Es decir, que un acero más dúctil no proporciona mayor ductilidad seccional que otro acero menos dúctil. Sin embargo, sabemos que el acero más dúctil desarrolla más trabajo, una vez que ha superado su límite elástico hasta la rotura, que un acero menos dúctil. La comparación en este caso se debería de realizar sin limitar al 10‰ la deformación máxima para ambos aceros, valor excesivamente pequeño que impide reflejar lo que pasa con el acero inoxidable en el ensayo de tracción. De esa forma, la “nueva” curvatura última tendría valores distintos para cada acero y, por lo tanto, la ductilidad de la sección tomaría valores que reflejarían las superiores características mecánicas y de ductilidad del acero inoxidable laminado en caliente.

Agradecimientos:

Los autores desean expresar su agradecimiento al Proyecto BIA2008-05398 del CICYT, España, por el soporte financiero, al Laboratorio de Materiales de la EUATM por su especial entrega en la realización de los ensayos, y a ACERINOX SA por la provisión de los aceros inoxidables utilizados. D. M. Bastidas agradece el contrato de investigación otorgado bajo el Programa Ramón y Cajal del Ministerio de Ciencia e Innovación.

REFERENCIAS

- [1] Bonnet D. y Rubaud M. (1976). Contribution á l'étude du comportement des métaux dans les bétons carbonatés. *Cahiers du Centre Scient et Tech. Du Bat.* **168**.
- [2] Andrade C., Alonso C. y Molina F.J. (1993). Cover cracking as a function of bar corrosion. Part I: experimental test. *Mat. Struct.* **26**, pag. 453.
- [3] Cobo A. (2001). *Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado: causas y procedimientos de rehabilitación*. Fundación Escuela de la Edificación. Madrid
- [4] Comisión Permanente Del Hormigón (2008). *EHE-08 Instrucción de hormigón estructural*. Ministerio de Fomento. Madrid.
- [5] Bastidas D.M., Cobo A., Otero E., González J.A. (2008). Electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures: advantages and pitfalls. *Corros. Eng. Sci. Techn.*, **43** 248–255.
- [6] Bastidas D.M., Fernández-Jiménez A., Palomo A., González J.A. (2008). A study on the passive state stability of steel embedded in activated fly ash mortars. *Corros. Sci.*, **50** 1058–1065.
- [7] Knudsen A. y Skoysgaard A. (2001). Stainless steel reinforcement. *Concrete Engineering International*, **3**, vol. 5, 59-62.
- [8] Bautista A., Blanco G., Velasco F., Gutierrez A., Palacín S., Soriano L., y Takenouti H. (2007). Pasivación de aceros inoxidables dúplex en disoluciones que simulan el hormigón contaminado con cloruros. *Materiales de construcción*, **57**, 288, 17-32.
- [9] Highways Agency (2002). *Design Manual for Roads and Bridge. Volume 1. Section 3. Part 15: BA 84/02 Use of Stainless Steel Reinforcement in Highway Structures*. Highways Agency. London.
- [10] Gedge G. (2000). Structural properties of stainless steel rebar. *Symposium Structural applications of stainless steel in building and architecture*. EUROINOX. Septiembre 2000, Bruselas. (www.euro-inox.org).
- [11] Qian S., Qu D., y Coates G. (2006). Galvanic coupling between carbon steel and stainless steel reinforcements. *Canadian Metallurgical Quarterly*, **4**, vol. 45, 475-484.
- [12] Abreu C.M., Cristóbal M.J., Montemor M.F., Nóvoa X.R., Pena G., Pérez M.C. (2002). Galvanic coupling between carbon steel and austenitic stainless steel in alkaline media. *Electrochemical Act.* **47**, 2271-2279.
- [13] AENOR (2002). *UNE-EN 10002-1 Materiales metálicos. Ensayos de tracción. Parte I: Método de ensayo a temperatura ambiente*. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid.
- [14] AENOR (2003). *UNE-EN ISO 15630-1 Aceros para el armado y el pretensado del hormigón. Métodos de ensayo. Parte I: Barras, alambres y alambazón para hormigón armado*. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid.

- [15] AENOR (1993). *UNE-ENV 1992-1-1: EUROCÓDIGO 2 Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación*. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid.
- [16] AENOR (1998). *EN 1998-1: EUROCÓDIGO 8 Proyecto de estructuras frente a sismo. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificación*. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid
- [17] GEHO-CEB (1995). *Código modelo CEB-FIP 1990*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- [18] Cosenza E., Greco C. y Manfredi, G. (1998). "An equivalent steel index in the assessment of the ductility performances of the reinforcement". Comité Euro-International du Béton. Bulletin n° 242, Ductility of Reinforced Concrete Structures. pags 157-170. Stuttgart.
- [19] Creazza G. y Russo S. (1998). "A new proposal for defining the ductility of concrete reinforcement steels by means of a single parameter". Comité Euro-International du Béton. Bulletin n° 242, Ductility of Reinforced Concrete Structures, pags 171-181. Stuttgart.
- [20] Ortega, H. (1998). *Estudio experimental de la influencia del tipo de acero en la capacidad de redistribución en losas de hormigón armado*. Tesis Doctoral. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.
- [21] CEB (1998). *Ductility of reinforced concrete structures*. Bulletin n° 242. Comité Euro-International du Béton. Stuttgart.
- [22] Castro H., Rodriguez C., Belzunce F.J. y Canteli A.F. (2003). Mechanical properties and corrosion behaviour of stainless steel reinforcing bars. *Journal of Materials Processing Technology*, **143-144**, 134-137.
- [23] Real E., Rodriguez C., Belzunce F.J. y Canteli A.F. (2008). Comportamiento a fatiga de armaduras de refuerzo de acero inoxidable dúplex sometidas a shot-peening. *Anales de Mecánica de la Fractura*, **25**, vol. 1, 367-372.
- [24] Gardner L., Talja A. y Baddoo N.R. (2006). Structural design of high-strength austenitic stainless steel. *Thin-walled structures*, **44**, 517-528.